

П. Г. ПЛІШКОВ, Н. Ю. ГАРАСЬОВА, В. П. СОЛДАТЕНКО

ОПТИМАЛЬНОЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ РОБОТИ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Розроблено оптимальну систему автоматичного керування режимом комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії, яка дозволяє забезпечити максимальний рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання відновлюваних джерел електроенергії та електроспоживачів до електричної мережі. Показано, що дану задачу автоматичного керування найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано структурну схему оптимальної системи автоматичного керування та алгоритм розрахунку вектора керування, в основу якого покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. На основі розроблених структурної схеми системи автоматичного керування та алгоритму визначення вектору керування створено комп'ютерну імітаційну модель, яка дозволяє проводити аналіз режиму роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. За допомогою даної моделі було визначено ефект від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування установками генерації електричної потужності. Аналіз результатів комп'ютерного імітаційного моделювання засвідчив, що застосування розробленої оптимальної системи керування, на відміну від базової моделі, дозволяє підвищити рівень генерації активної потужності в районну електричну мережу за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги. Так, при використанні розробленої системи автоматичного керування комбінованою електроенергетичною системою з відновлюваними джерелами енергії досягнуто збільшення генерації активної потужності в мережу на 8,13 %, порівняно з випадком базової моделі. При цьому результати статистичної обробки значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів засвідчили, що даний показник якості електроенергії для випадку розробленої системи автоматичного керування задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, система автоматичного керування, алгоритм, відхилення напруги.

П. Г. ПЛІШКОВ, Н. Ю. ГАРАСЕВА, В. П. СОЛДАТЕНКО

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Разработано оптимальную систему автоматического управления режимами комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии, которая позволяет обеспечить максимальный уровень генерации активной мощности при условии соблюдения нормально допустимых значений установившегося отклонения напряжения в точке присоединения возобновляемых источников электроэнергии и электропотребителей к электрической сети. Показано, что данную задачу автоматического управления наиболее целесообразно интерпретировать как задачу многокритериальной оптимизации. Предложено структурную схему оптимальной системы автоматического управления и алгоритм расчета вектора управления, в основу которого положены решения задачи многокритериальной оптимизации методом приближения к утопической точке в пространстве критериев. На основании разработанных структурной схемы системы автоматического управления и алгоритма определения вектора управления создана компьютерная имитационная модель, которая позволяет проводить анализ режима работы комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии. С помощью данной модели был определен эффект от применения разработанного алгоритма автоматического управления установками генерации электрической мощности. Анализ результатов компьютерного имитационного моделирования показал, что применение разработанной оптимальной системы управления, в отличие от базовой модели, позволяет повысить уровень генерации активной мощности в районную электрическую сеть при условии соблюдения нормально допустимых значений установившегося отклонения напряжения. Так, при использовании разработанной системы автоматического управления комбинированной электроэнергетической системой с возобновляемыми источниками энергии достигнуто увеличение генерации активной мощности в сеть на 8,13 %, в сравнении со случаем базовой модели. При этом результаты статистической обработки значений установившегося отклонения напряжения в точке присоединения электропотребителей показали, что данный показатель качества электроэнергии для случая разработанной системы автоматического управления удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109-97.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, система автоматического управления, алгоритм, отклонение напряжения.

P. G. PLIESHKOV, N. Y. GARASEVA, V. P. SOLDATENKO

OPTIMAL CONTROL OF THE WORK OF THE HYBRID ELECTRIC ENERGY SYSTEM WITH RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

Were developed an optimal system of automatical control for mode of hybrid electric power supply system with renewable energy sources, that let increase the maximal active power generation level in the case when were maintaining the normal admissible level of voltage deviation in the point of connection of renewable electric power sources and power consumers into the grid. It is shown that this task of automatical control is most acceptable to interpret as the matter of multicriterial optimisation. Where proposed a structural circuit of optimal system of automatical control and algorithm of calculation vector of the control, which based on the solution of the problem of multicriterial optimization using the method of approximation to the utopia point in the criteria space. Basing on the developed the structural circuit and the algorithm of definition vector of the control was created the computer imitational model which is let to analyze the modes of hybrid power system with renewable energy sources. Using the model was definite the effect from the application of the developed algorithm of automatic control of electric power generation plants. An analysis of computer imitational modeling results show that application of developed optimal automatic control system, in diverse from basic model, is let to increase the level of generation of active electric power into distribution grid in case of maintaining the normal admissible levels of voltage deviation. In case of application of the developed automatic control system for hybrid power system with renewable power sources were gained the increase of power generation to the distribution grid on 8,13 % more than in case of exploitation of based model. In this conditions the results of statistical analysis of values of voltages stable deviation in the connection point for electrical power consumers is shown that the electricity quality indicator for the case of developed automatic control system is appropriate with GOST 13109-97.

Keywords: renewable energy sources, automatic control system, algorithm, voltage deviation.

© П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьева, В. П. Солдатенко, 2018

Вступ. Сучасний етап розвитку енергетики України характеризується все більшим поширенням установок генерації електричної потужності з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Згідно даних Держенергоефективності України в секторі відновлюваної енергетики введено потужностей, що генерують електричну енергію за «зеленим» тарифом, у 2016 р. – 121 МВт, у 2017 р. – 257 МВт, за три місяці 2018 р. – 159,4 МВт.

Зважаючи на географічне розташування та кліматичні умови, в Україні найбільшого розповсюдження набули сонячні електростанції (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС). На підприємствах агропромислового комплексу, досить поширеними є установки по переробці біологічних відходів з подальшим виробництвом електроенергії – біогазові електростанції (БГЕ). Основною метою встановлення таких установок на промислових підприємствах є зниження плати за спожиту електроенергію за рахунок власного її виробництва. До того ж, продаж надлишку генерованої електроенергії в енергосистему за «зеленим» тарифом значно скорочує термін окупності таких установок.

Приєднання установок з ВДЕ до електричної мережі відбувається на різних її рівнях в залежності від їх потужності та призначення. Для випадку застосування установок з ВДЕ на промислових підприємствах, точка їх підключення до розподільної електричної мережі (РЕМ), як правило, співпадає з точкою приєднання електроспоживачів.

Приєднання установок з ВДЕ до РЕМ напругою 0,4 – 35 кВ потребує здійснення заходів з модернізації електричних мереж. Проте, реалізація таких заходів ускладнюється рядом суттєвих факторів, основним з яких є необхідність значних капіталовкладень. З цієї причини приєднання установок з ВДЕ до РЕМ часто не супроводжується модернізацією останніх.

В зв'язку з цим нерідко виникає ситуація, коли в режимі реверсивного потоку потужності в РЕМ спостерігаються понаднормові завищені значення усталеного відхилення напруги.

Системи автоматичного керування (САК) сучасних установок з ВДЕ дозволяють здійснювати керування значенням усталеного відхилення напруги в точці приєднання шляхом автоматичної зміни рівня генерації потужності в електричну мережу. Так, в режимі реверсивного потоку потужності в РЕМ для уникнення завищених значень усталеного відхилення напруги, САК установок з ВДЕ здійснює обмеження генерації потужності в РЕМ в залежності від верхнього значення уставки по напрузі. Такий підхід до регулювання гарантовано забезпечує нормально допустимі значення усталеного відхилення напруги в точці приєднання установок з ВДЕ.

Проте суттєвим його недоліком є зниження рівня генерації активної потужності в мережу і, як наслідок, скорочення фінансових надходжень від продажу електричної енергії по «зеленому» тарифу.

Тому, задача удосконалення САК установками з ВДЕ з метою забезпечення максимального рівня генерації активної потужності цими установками за

умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до РЕМ є актуальною.

Аналіз публікацій. Питання удосконалення керування установками з ВДЕ за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної мережі розглядалося в роботах [1-5]. Зокрема у роботі [4] була запропонована математична модель, яка формалізує задачу керування режимом комбінованої електроенергетичної системи (КЕС) з ВДЕ таким чином, щоб забезпечити максимально можливий рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної мережі. Шляхом порівняння переваг і недоліків методів розв'язку задачі керування був обраний метод багатокритеріальної оптимізації. В роботі [5] був проведений аналіз методів розв'язку задач скалярної оптимізації та висунуті вимоги до САК, що здатна реалізувати керування в режимі реального часу. Однак, для визначення ефективності обраного методу розв'язку шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання необхідно на основі запропонованої в [4] математичної моделі керування розробити структурну схему САК, алгоритм визначення вектора керування та створити на їх основі комп'ютерну імітаційну модель автоматичного керування режимом КЕС з ВДЕ.

Мета роботи. Метою даної статті є розробка та дослідження роботи САК режимом КЕС з ВДЕ, що забезпечить максимально можливий рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– розробити структурну схему САК режимом КЕС з ВДЕ та алгоритм розрахунку вектора керування;

– створити комп'ютерну імітаційну модель САК установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ;

– визначити ефект від застосування розроблених алгоритмів автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ, шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу досліджень. В роботі [4] була сформульована задача автоматичного керування режимом КЕС з ВДЕ у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації [4-5]:

$$\begin{cases} Q_1(P_{\text{ген}}) = -P(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2(P_{\text{ген}}) = 3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (1)$$

де $P_{\text{ген}}$ – потужність, яка генерується установками ВДЕ в електромережу;

$[P_{\min} \dots P_{\max}]$ – область допустимих значень $P_{\text{ген}}$;

$P(P_{\text{ген}})$ – прибуток від генерації потужності в електромережу установками з ВДЕ по «зеленому» тарифу;

$$P(P_{\text{ген}}) = c_0^{\text{ВДЕ}} P_{\text{ген}}, \quad (2)$$

де $c_0^{\text{ВДЕ}}$ – середнє арифметичне зважене по потужності генерації установками з ВДЕ значення ставки «зеленого» тарифу:

$$c_0^{\text{ВДЕ}} = \frac{c_0^{\text{СЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + c_0^{\text{ВЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + c_0^{\text{БГЕ}} P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}{P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}$ – потужність генерації СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно;

$c_0^{\text{СЕС}}$, $c_0^{\text{ВЕС}}$, $c_0^{\text{БГЕ}}$ – ставки «зеленого» тарифу для електроенергії, що генерується СЕС, ВЕС та БГЕ відповідно;

$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$ – економічні збитки від понаднормових значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів:

$$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) = a_1 [\Delta U(P_{\text{ген}}) + a_2]^2 \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{н max}}}, \quad (4)$$

де $\Delta U(P_{\text{ген}})$ – значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів;

a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти, що визначаються якісним складом електроспоживачів;

$S_{\text{н}}$ – поточне значення повної потужності навантаження;

$S_{\text{н max}}$ – максимальне значення повної потужності навантаження.

Задача (1) є задачею багатокритеріальної оптимізації. В роботах [6-12] показано, що для знаходження розв'язків задач, подібних до (1), найдоцільніше скористатися методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Згідно даного методу знаходяться координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\text{min}}, Q_{2\text{min}})$ в просторі критеріїв оптимізації $Q \subset \mathbb{R}^2$ в результаті визначення оптимального (мінімального) значення кожного з критеріїв. Після цього, шляхом вирішення серії задач мінімізації відстані ρ від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації $P_{\text{ген}}^{\text{орт}}$ в просторі керування $P^{\text{орт}} \subset \mathbb{R}^3$.

Для випадку чебишевської метрики знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) набуває вигляду [4]:

$$\begin{cases} Q(P_{\text{ген}}) = \max \left\{ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут1}}}{k_1}, \right. \\ \left. \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут2}}}{k_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{cases} \quad (5)$$

де k_1 та k_2 – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

На рис. 1 наведено структурну схему САК режимом генерації КЕС з ВДЕ, що базується на розв'язках задачі керування (1).

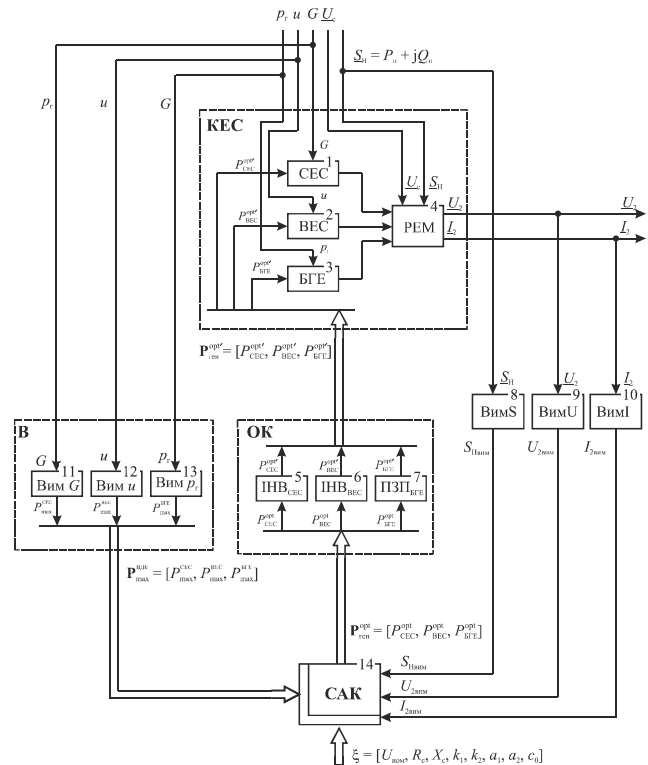


Рис. 1. Структурна схема САК режимом генерації КЕС з ВДЕ

На рис. 1: КЕС – комбінована електроенергетична система; ОК – об'єкт керування; В – вимірювач енергетичних характеристик ВДЕ; $p_{\text{г}}$ – тиск газу в газгольдері біогазової установки; u – швидкість вітру; G – інтенсивність сонячного випромінювання; U_c – напруга, яка підтримується в районній електричній мережі; $S_{\text{н}} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}}$ – комплексна потужність навантаження; U_2 – комплекс напруги на шинах споживача; I_2 – комплекс струму в лінії; $S_{\text{нвим}}$ – виміряне значення комплексної потужності навантаження; $U_{2\text{вим}}$ – виміряне діюче значення комплексу напруги на шинах споживача; $I_{2\text{вим}}$ – виміряне значення комплексу струму в лінії; $\xi = [U_{\text{ном}}, R_c, X_c, k_1, k_2, a_1, a_2, c_0]$ – вектор задаючих параметрів; $P_{\text{ген}}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}]$ – вектор максимальних значень потужності ВДЕ; $P_{\text{ген}}^{\text{орт}} = [P_{\text{ген}}^{\text{орт СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{орт ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{орт БГЕ}}]$ – вектор оптимальних значень потужностей ВДЕ, що визначений САК (вихідний сигнал САК); $P_{\text{ген}}^{\text{орт}} = [P_{\text{ген}}^{\text{орт СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{орт ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{орт БГЕ}}]$ – вектор значень потужностей ВДЕ, що задається виконавчим пристроєм; 1 – сонячна електростанція; 2 – вітрова електростанція; 3 – біогазова електростанція; 4 – розподільна електрична мережа; 5 – інвертор сонячної електростанції; 6 – інвертор вітрової електростанції; 7 – інвертор біогазової електростанції; 8 – вимірювач потужності навантаження; 9 – вимірювач напруги на шинах споживачів; 10 – вимірювач струму в лінії; 11 – вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання; 12 – вимірювач швидкості вітру; 13 – вимірювач тиску газу в газгольдері біогазової установки; 14 –

САК, що реалізує розрахунок вектора керування.

САК, структурну схему якої приведено на рис. 1 працює наступним чином. В блок 14 від вимірювачів енергетичних характеристик ВДЕ (11–13) надходить вектор $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\max}^{\text{СЕС}}, P_{\max}^{\text{ВЕС}}, P_{\max}^{\text{БГЕ}}]$ даних про максимально можливу в даний момент генерацію потужності установками ВДЕ.

На основі вектора $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}}$ та даних вимірювань значення потужності споживання $S_{\text{НВМ}}$, напруги на шинах споживачів $U_{2\text{ВМ}}$, струму в лінії $I_{2\text{ВМ}}$, в блоці 14 відбувається розрахунок вектору оптимальних значень генерації потужностей ВДЕ $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{орт}}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{орт}}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{орт}}]$. Вектор $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$ передається на інвертори СЕС, ВЕС та БГЕ, які відповідно із власними технічними параметрами задають максимально близьку уставку потужності $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}'} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{орт}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{орт}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{орт}'}]$.

Алгоритм розрахунку оптимального вектора керування $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$ режимом КЕС з ВДЕ приведений на рис. 2 у вигляді блок-схеми.

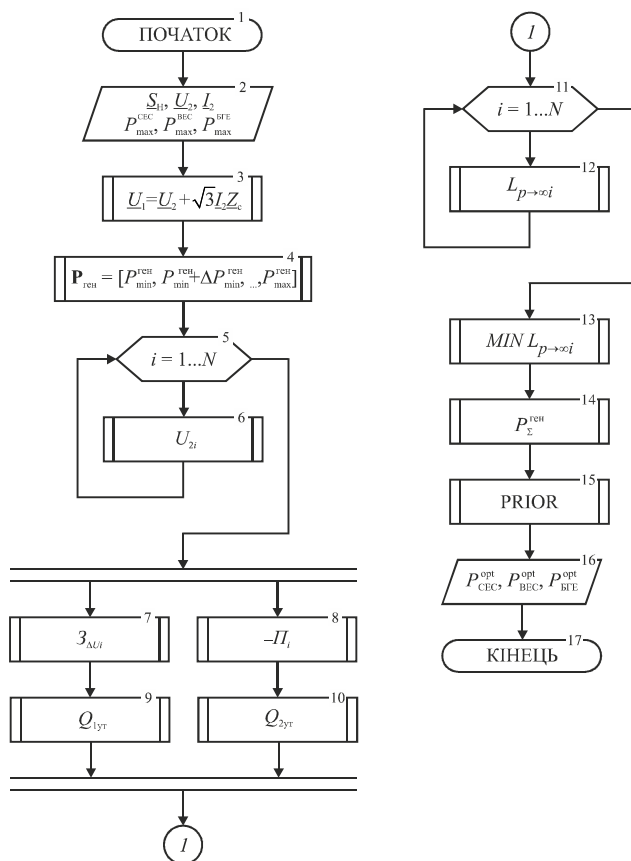


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку оптимального вектора керування режимом роботи КЕС з ВДЕ

На рис. 2: 3 – процедура визначення напруги мережі U_c по відомим параметрам мережі та виміряним значенням потужності навантаження і струму в лінії; 4 – процедура дискретизації простору $\mathbf{P}_{\text{ген}} = [P_{\min}^{\text{ген}}, P_{\min}^{\text{ген}} + \Delta P_{\min}^{\text{ген}}, \dots, P_{\max}^{\text{ген}}]$ можливої потужності генерації; 6 – процедура розрахунку напруги U_2 на шинах споживача, при відповідних значеннях

потужності генерації із простору $\mathbf{P}_{\text{ген}}$, 7 – процедура визначення критерію Q_1 ; 8 – процедура визначення критерію Q_2 ; 9 і 10 – процедури визначення координат утопічної точки $Q_{1\text{ут}}$ і $Q_{2\text{ут}}$, реалізуються методом повного перебору; 12 – процедура визначення відстаней від елементів множини парето-оптимальних розв'язків та променя, що виходить з утопічної точки $Q_{\text{ут}}$ ($Q_{1\text{ут}}$, $Q_{2\text{ут}}$) під кутом γ ; 13 – процедура пошуку мінімальної відстані від множини парето-оптимальних розв'язків до променя, що виходить з утопічної точки $Q_{\text{ут}}$ ($Q_{1\text{ут}}$, $Q_{2\text{ут}}$) під кутом γ , реалізується методом повного перебору; 14 – процедура визначення оптимальної величини сумарної потужності генерації; 15 – процедура пріоритетного розподілу оптимальної величини сумарної потужності генерації між окремими видами ВДЕ та визначення оптимального вектора керування $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$.

На рис. 3 представлено узагальнену комп'ютерну імітаційну модель САК режимом генерації КЕС з ВДЕ.

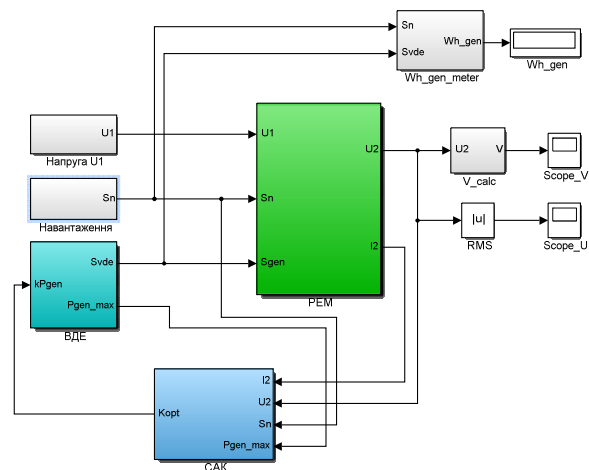


Рис. 3. Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель САК режимом КЕС з ВДЕ для Matlab Simulink

Узагальнена модель САК режимом генерації КЕС з ВДЕ включає: «Напруга U1» – блок моделювання напруги РЕМ; «Навантаження» – блок моделювання навантаження споживачів; «ВДЕ» – блок моделювання роботи установок ВДЕ; «РЕМ» – блок моделювання режиму роботи РЕМ; «САК» – блок моделювання роботи САК режимами генерації; «Wh_gen_meter» – блок розрахунку згенерованої електричної енергії; «V_calc» – блок розрахунку відхилення напруги на шинах споживача; «RMS» – блок розрахунку діючого значення напруги на шинах споживача.

Для визначення ефекту від застосування розв'язку задачі керування (1) було проведено моделювання роботи РЕМ з КЕС з ВДЕ для таких випадків: при відсутності керування; для базової моделі при керуванні, що обмежує відхилення напруги на шинах споживачів значенням 5%; при розробленому оптимальному керуванні.

Статистична обробка результатів моделювання полягала у визначенні інтегральної імовірності потрапляння значення відхилення напруги V на шини споживачів у нормально допустимі межі

$$P(V_{\min} \leq V \leq V_{\max}) = \frac{N_{\text{доп}}}{N}, \quad (6)$$

де P – інтегральна імовірність потрапляння величини відхилення V в діапазон значень $V_{\min} < V < V_{\max}$;

$N_{\text{доп}}$ – кількість значень величини V , що входять в діапазон допустимих значень;

N – загальна кількість вимірювань величини V .

Результати комп'ютерного моделювання режиму роботи КЕС з ВДЕ для випадку відсутності регулювання приведені на рис. 4.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК базової моделі (з обмеженням відхилення напруги значенням 5 %) приведені на рис. 5.

Результати комп'ютерного моделювання роботи розробленої САК при оптимальному керуванні приведені на рис. 6.

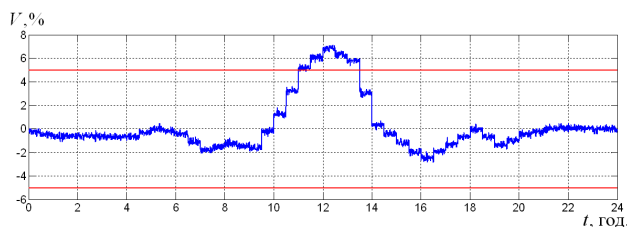


Рис. 4. Графік відхилення напруги на шини споживача без керування режимом

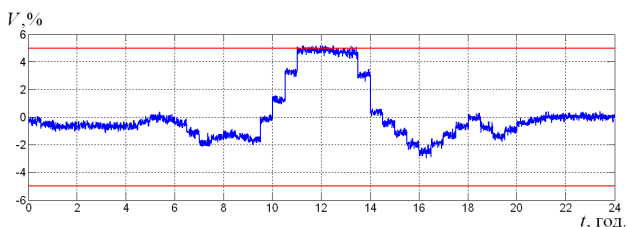


Рис. 5. Графік відхилення напруги на шини споживача при обмеженні відхилення напруги значенням 5 %

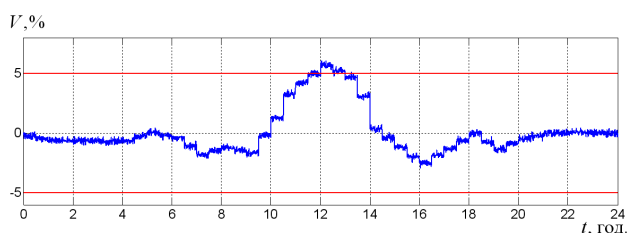


Рис. 6. Графік відхилення напруги на шини споживачів при керуванні режимом розробленою САК

Результати моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Числові результати моделювання

№	Показник	Модель базової САК	Модель розробленої САК
1	Електроенергія вироблена СЕС, кВт·год	992,6	1128
2	Електроенергія вироблена ВЕС, кВт·год	84,32	83,72
3	Електроенергія вироблена БГЕ, кВт·год	508,8	503,3
4	Електроенергія вироблена ВДЕ, кВт·год	1585,72	1715,02

Так для випадку без керування режимом генерації видно, що при цьому в РЕМ генерується максимальна кількість електроенергії – 219,3 кВт·год. Однак відхилення напруги V на шини споживача виходить за межі допустимих значень $[-5 \% \dots 5 \%]$ з інтегральною імовірністю 89,79 %, що суперечить вимогам ГОСТ 13109-97.

Для випадку базової моделі керування режимом генерації з обмеженням величини V крайніми межами діапазону $[-5 \% \dots 5 \%]$ вдається досягти 100 % потрапляння відхилення в діапазон допустимих значень. Однак при цьому величина генерації в РЕМ, а відтак і економічний ефект зменшується.

Застосування оптимального керування розробленою САК дозволяє підвищити рівень генерації в РЕМ, порівняно з базовою моделлю керування, на 8,13 %. При цьому інтегральна імовірність потрапляння величини відхилення в діапазон допустимих значень складає 95 %, що задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

Таким чином реалізація алгоритму оптимального керування САК режимом КЕС з ВДЕ при розглянутих умовах дозволяє підвищити рівень генерації електроенергії в РЕМ на 8,13 % при збереженні технічних вимог ГОСТ 13109-97 до показника відхилення напруги V .

Висновки. Проведене дослідження показало:

1. Задачу оптимального керування режимом КЕС з ВДЕ за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Для вирішення даної задачі найдоцільніше застосовувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

2. Розроблені структурна схема САК режимом КЕС з ВДЕ та алгоритм визначення оптимального вектора керування, в основу яких покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації дозволили створити комп'ютерні імітаційні моделі САК режимом КЕС з ВДЕ.

3. Результати комп'ютерного моделювання розробленої САК, в основу роботи яких покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації підтвердили перевагу запропонованої САК над базовою. Так, для випадку розробленої САК величина генерації активної потужності виявилась на 8,13 % більшою в порівнянні з базовою САК. При цьому значення усталеного відхилення напруги для

випадку розробленої САК задовольняють вимогам ГОСТ 13109-97.

Список літератури

1. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України: збірник наукових праць. Спеціальний випуск, ч. 1. – 2011. – С. 48–55.
2. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, І. О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.
3. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145.
4. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2017. №34(1256)2017 – С. 66–70
5. Солдатенко В. П. Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні навки. Вип. 187 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2017 – С. 37–39.
6. Плешков П. Г. Оптимальне керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж із використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторів / П. Г. Плешков, Ю. А. Леванцова, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2017. №34(1256)2017 – С. 56–61
7. Тарануха М. С. Оптимальне керування режимами реактивного навантаження за умов несиметрії напруг розподільних електричних мереж / М. С. Тарануха, Р. В. Телюта, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 42. – С. 62–66.
8. Зінзура В. В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 3. – С. 99–109.
9. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350–360.
10. Машиунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 141 С.
11. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 С.
12. Токарев В. В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т. 2. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 С.

References (transliterated)

1. Lezhniuk P. D., Kulyk V. V., Kovalchuk O. A. Optymalne keruvannya rozoseredzhenymy dzhерелamy enerhhiy v lokalnii elektrichnii systemi [Optimal control of scattered energy sources in the local electrical system] *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats. Spetsialnyi vypusk* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of

- Sciences of Ukraine: collection of scientific works. Special issue.] – 2011. – part 1. – pp. 48–55.
2. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv soniachnykh elektrichnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV [Flush of sonny electric power stations on the spur of settling 0,4 kV] *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*. [Energy: economics, technology, ecology: science journal] – 2015. – no. 3 (41). – pp. 7–13.
3. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv invertoriv SES na pokaznyky yakosti elektrichnoi enerhii v LES [Influence of solar power inverters on electrical energy quality in local electrical systems]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* [Bulletin of the Khmelnytsky National University. Technical sciences.]. – 2015. – no. 2. – pp. 134–145.
4. Soldatenko V. P., Plieskov P. G. Avtomatychne keruvannya rezhymamy roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzhерелamy enerhii [Automatic control of the modes of operation of the combined power system with renewable energy sources] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonalennia elektrichnykh mashyn i aparativ*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus.] – 2017. no. 34(1256)2017 – pp. 66–70
5. Soldatenko V. P. Systema avtomatychnoho keruvannya robotoiu kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzhерелamy enerhii [The system of automatic control of the operation of a combined power system with renewable energy sources] *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Tekhnichni navky. Vyp. 187 Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy*. [Bulletin KhNTUSH P. Vasilenko. Technical lessons. Whip 187 Problems of power supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine.] – 2017 – pp. 37–39.
6. Plieskov P. H., Levantsova Yu. A., Zinzura V. V. Optymalne keruvannya rezhymamy napruh nyzkovoltnykh rozpodilnykh elektrichnykh merezh iz vykorystanniam rehuliuichykh prystroiv sylovykh transformatoriv [Optimal control of voltage regimes of low-voltage distribution electric networks using regulating devices of power transformers] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonalennia elektrichnykh mashyn i aparativ*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus.] – 2017. no. 34(1256)2017 – pp. 56–61
7. Taranukha M. S., Teliuta R. V., Zinzura V. V. Optymalne keruvannya rezhymamy reaktivnoho navantazhennia za umov nesymetrii napruh rozpodilnykh elektrichnykh merezh [Optimal control of reactive load modes in the conditions of asymmetry of distributive electrical networks voltage] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Problemy udoskonalennia elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific works. Thematic issue: Problems of improvement of electric machines and apparatuses. Theory and practice.] – 2015. – no. 42. – pp. 62–66.
8. Zinzura V. V. Rozrobka ta doslidzhennia roboty systemy avtomatychnoho upravlinnia prystroiem RPN sylovoho transformatora [Development and research of the system of automatic control of the control device under the voltage of the power transformer] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Problemy udoskonalennia elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific works. Thematic issue: Problems of improvement of electric machines and apparatuses. Theory and practice.] – 2012. – no. 3. – pp. 99–109.
9. Zinzura V. V. Metody rozv'iazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuivannia napruhy v elektrichnykh merezhakh. [Methods of solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electric networks] *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University] – 2012. no. 25 – part 1 – pp. 350–360.

10. Mashunyn Yu. K. Metody y modely vektornoї optymizatsyy. [Methods and models of vector optimization.] – Moscow – 1986. – 141 pp.
11. Chernorutskiy Y. H. Metody pryniatya resheniy. [Methods of decision making] – Saint Petersburg – 2005. – 416 pp.
12. Tokarev V. V. Metody optimalnykh resheniy. V 2 t. T. 2. Mnokryteryalnost. Dynamika. Neopredelennost. – 2-e yzd., pererab. y dop. [Methods of optimal solutions. In 2 t. T. 2. Multi-criterion. Dynamics. Uncertainty - 2nd ed., Pererab. and add] – Moscow – 2000. – 252 pp.

Надійшла (received) 18.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плешков Петро Григорович (Плешков Петр Григорьевич, Pleshkov Petr Grigorievich) – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, професор кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Гарасьова Наталія Юріївна (Гарасьова Наталья Юрьевна, Garasova Natalia Yuriivna) – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-4681>; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Солдатенко Валентин Петрович (Солдатенко Валентин Петрович, Soldatenko Valentyn Petrovych) – Центральноукраїнський національний технічний університет, викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>; e-mail: kirovograd41@gmail.com.